

Chemical and physical properties of the Fe-S-Si system under high pressure and temperature: Implications for the planetary cores

著者	坂入 崇紀
号	77
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3087号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00121797

論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	坂入 崇紀	提出年	平成 2 9 年
学位論文の 題 目	Chemical and physical properties of the Fe–S–Si system under high pressure and temperature: Implications for the planetary cores (高温高压下における Fe–S–Si の化学的及び物理的性質：惑星核への応用)		

論文目次

Abstract

Acknowledgement

Contents

Chapter 1: Introduction

- 1.1. The density deficit of the Earth's core
- 1.2. Sound velocity of the Earth's core
- 1.3. Light elements in the planetary cores
- 1.4. References

Chapter 2: Melting relationships in the Fe–S–Si system at high pressure and temperature

- 2.1. Introduction
- 2.2. Experimental procedure
 - 2.2.1. Sample preparation
 - 2.2.2. In situ X-ray diffraction experiments
- 2.3. Results
 - 2.3.1. Subsolidus phases in the Fe–S–Si system
 - 2.3.2. Solidus and liquidus temperatures in the Fe–S–Si system
- 2.4. Discussion
 - 2.4.1. Comparisons with previous melting curves
 - 2.4.2. Implications for the core of the Mars and Mercury
- 2.5. References

Chapter 3: Element partitioning between metallic solid and liquid in the Fe–S–Si system up to 148 GPa

- 3.1. Introduction
- 3.2. Experimental procedure

3.2.1. Sample preparation

(NO. 2)

3.2.2. Chemical analyses of the recovered samples

3.3. Results

3.3.1. Chemical analysis of recovered samples

3.3.2. Partitioning coefficients of sulfur, silicon, and oxygen

3.3.3. Pressure and temperature dependences of D_{sulfur} , D_{silicon} , and D_{oxygen}

3.4. Discussion

3.4.1. Calculation of the amount of light elements in the bulk core

3.4.2. Estimate of the composition of the core

3.5. References

Chapter 4: Sound velocity measurements of the Fe–Si alloy at high pressure and temperature

4.1. Introduction

4.2. Experimental procedure

4.2.1. Sample preparation

4.2.2. Inelastic X-ray scattering at SPring-8

4.3. Results

4.3.1. Sound velocity of Fe–Si alloy

4.3.2. Birch's law of Fe–Si alloy

4.4. Discussion

4.4.1. The effect of temperature on sound velocity Fe–Si alloy

4.4.2. Comparisons of Birch's law of Fe–Si alloy

4.4.3. The amount of silicon in the Earth's inner core

4.5. References

Chapter 5: Summary

5.1. Summary

Abstract

The physical properties, such as density and sound velocity, of the Earth's deep interior have been determined by seismic observations known as PREM and it is accepted that the core of the Earth is composed of mainly Fe alloy. However, the density and sound velocity of pure iron at high pressure and temperature conditions could not explain those of PREM. This suggests the Earth's core contains some light elements (S, Si, O, C, and H). Sulfur and silicon are both important candidates as light elements and some geochemical models predicted that sulfur and silicon could be present not only in the core of the Earth but also in the core of other terrestrial planets such as Mars and Mercury. Therefore, it is essential for understanding the property of the planetary core to reveal the chemical and physical properties of the Fe–S–Si system. In this study, high pressure experiments in the Fe–S–Si system have been performed related to the melting relationships (Chapter 2), element partitioning (Chapter 3), and sound velocity (Chapter 4). The present experimental results were applied to discuss the core formation of Mars and Mercury and the chemical composition of the Earth's core.

In Chapter 2, the phase and melting relationships in the Fe–S–Si system were determined up to 60 GPa by using a double-sided laser-heated diamond anvil cell combined with X-ray diffraction. On the basis of the X-ray diffraction patterns, I confirmed that hcp/fcc Fe–Si alloys, and Fe₃S are stable phases under subsolidus conditions in the Fe–S–Si system. Both solidus and liquidus temperatures are significantly lower than the melting temperature of pure Fe and both increase with pressure. The slopes of the Fe–S–Si liquidus and solidus curves determined here are smaller than the adiabatic temperature gradients of the liquid cores of Mercury and Mars. -Thus, crystallization of their cores started at the core–mantle boundary region.

In Chapter 3, an experimental study on solid–liquid partitioning in the Fe–S–Si system was

reported up to 148 GPa. The metallic liquid phase was relatively sulfur rich, whereas the coexisting hcp-Fe phase was silicon rich. Based on the partitioning data, the total amount of light elements in the bulk core of the Earth was constrained to be 7.4–9.9 wt. %. The present results demonstrated that the present-day Earth has a sulfur-rich outer core and a significant amount of sulfur may create the seismologically observed density contrast between the inner and outer cores.

In Chapter 4, the sound velocity of Fe–6wt. % Si alloy at high pressure and temperature conditions was measured using inelastic X-ray scattering method. The V_P of Fe–Si alloy in this study were followed linear relationships between density and velocity and the present result indicated that the effect of temperature on the V_P of Fe–Si alloy was very small than that of pure iron. The Birch's law for Fe–6wt. % Si, was obtained as $V_P = 0.90 \pm 0.12 \times \rho - 0.15 (\pm 1.19)$. By using linear mixing model, the present result indicates that 2.2(3) wt. % of silicon in the Earth's inner core can explain both the density and sound velocity of the PREM at ICB condition assuming that the light element in the inner core is only silicon.

論文審査等報告書

博士の 専攻分野	博士（理学）	ふりがな 氏 名	さかいり たかのり 坂入 崇紀
論文審査の 結果の要旨 及びその 担当者氏名	<p>別紙のとおり</p> <p>論文審査担当者氏名</p> <p>（主査）准教授 鈴木 昭夫</p> <p>教 授 掛川 武</p> <p>教 授 中村 美千彦</p> <p>教 授 中村 智樹</p> <p>教 授 辻森 樹</p> <p>名誉教授 大谷 栄治</p>		
最終試験の 結果の要旨 及びその 担当者氏名	<p>本学大学院理学研究科の選定した 下記担当者が行った試験に合格した。</p> <p>試験担当者氏名</p> <p>（主査）准教授 鈴木 昭夫</p> <p>教 授 掛川 武</p> <p>教 授 中村 美千彦</p> <p>教 授 中村 智樹</p> <p>教 授 辻森 樹</p> <p>名誉教授 大谷 栄治</p> <p>准教授 平野 直人</p> <p>准教授 長瀬 敏郎</p>		
博士論文審 査機関の名 称及び組織	<p>名称 審査会</p> <p>組織 委員 6 名</p>		
修了の要件	本研究科規定の定める修了要件を満たしている。		
判定の方法	理学研究科委員会の議決による。		

備考 この報告書は、本人に記入させないこと。

論文審査の結果の要旨

坂入崇紀は、東北大学大学院理学研究科博士課程に在籍していた時に、高温高压下における Fe-S-Si の化学的及び物理的性質に関する研究を行った。坂入崇紀は、就職のために博士課程は退学したが、今回、在学時代から続けてきた研究が博士論文としてまとまったため、審査を行った。

坂入崇紀は、地球核に近い温度圧力条件で Fe-S-Si 系の溶融実験を行った。その結果、サブソリダス条件で hcp/fcc Fe-Si 合金及び Fe₃S が安定相であることを新たに見出した。Fe-S-Si 系でのソリダス、リキダス曲線は Fe 単独系でのそれよりもはるかに低い温度領域に現れることが分かった。なおかつ、ソリダス、リキダス曲線の傾きは金星や火星の液状核の断熱曲線の傾きよりも小さいことが明らかになった。

さらに実験条件を 148 GPa の高压条件に拡大し、そこでの液相と固相に対する S と Si の分配関係を検証した。その結果、液相は硫黄に富み、hcp-Fe phase からなる固相では Si に富むことが分かった。これらの分配関係から地球核全体には 7.4-9.9 wt. % の軽元素が存在していることが示唆された。さらに地球の外核は硫黄に富み、地震学データから得られた内核との密度の違いが多量に溶け込んだ硫黄の存在によって説明できる可能性が示された。

本研究において、高温高压状態での 6 wt % の鉄を含んだ Si 合金の音速が X 線散乱法によって測定された。それによって Fe-Si 合金のは V_P は 密度に対して直線的関係にあることが見出された。Fe-Si 合金の V_P に対する温度効果は純粋な Fe の V_P よりも小さいことが分かった。Birch's law から計算される 6 wt % の鉄を含んだ Si 合金の音速は $V_P = 0.90 \pm 0.12 \times \rho - 0.15$ (± 1.19) である。線形混合モデルを用いると PREM による ICB 周辺の音速と密度は、内核に 2.2 (3) wt % の Si が存在すれば説明可能という結果を得た。

坂入崇紀は、一つ一つの課題に真摯に向き合うことで、PREM の提示した地球深部の姿、地震波などの観測結果、高压実験による化学組成を整合的に説明できるモデルを提示した。さらに本研究の結果が、火星や金星の核の組成や物理的状态にも制約を与えうることを示した。この研究成果は非常に独創的であり、博士論文として妥当であると論文審査会において認められた。さらに研究成果は、今後自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、坂入崇紀提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。